

构网型设备相角跳变暂态稳定性分析与控制

崔润玉 邱富东 赵志渊 魏振华 姚小强 陈灿章

国家电投集团综合智慧能源有限公司 北京市海淀区 100080

摘要: 本文针对构网型设备在强弱电网下相角跳变的暂态稳定性问题, 通过深入分析相角跳变对系统动态特性的影响, 提出了提升相角跳变暂态稳定性的核心途径。基于此, 设计了一种结合功率定值切换与相位补偿的控制方案, 旨在抑制相角跳变并增强系统稳定性。通过仿真和实验验证, 结果表明所提出的控制策略能够有效改善构网型设备在暂态过程中的相角动态特性, 显著提升系统在强弱电网条件下的暂态稳定性。本文的研究为构网型设备在复杂电网环境下的稳定运行提供了理论依据和实用化解决方案。

关键词: 构网型设备; 相角跳变; 功率定值切换; 相位补偿

1 引言

随着可再生能源的快速发展, 电力系统的结构和运行方式正在发生深刻

变革。传统的同步发电机逐渐被基于电力电子技术的电压源变流器 (Voltage- Source Converter, VSC) 所取代, 尤其是在风能、太阳能等分布式发电系统中。然而, 大规模可再生能源的接入给电力系统的稳定性带来了新的挑战, 特别是在弱电网或故障条件下, 传统的跟网型 (Grid-Following, GFL) 变流器往往难以维持系统的稳定运行。

构网型 (Grid-Forming, GFM) 变流器作为一种新兴的控制策略, 能够模拟同步发电机的行为, 主动为电网提供电压和频率支持, 从而增强系统的稳定性 [1-3]。然而在复杂工况下, 电网拓扑突变或大功率扰动引发的相角跳变现象可能导致传统构网控制策略失稳, 严重时甚至引发连锁故障。现有研究多聚焦于电压源型变流器的稳态性能优化, 但对不同电网强度下的暂态过程大相角跳变动态调节机理缺乏有效分析和研究。

针对这一问题, 本文通过分析强弱网下相角跳变引起系统暂态失稳的机理, 给出了提升稳定相角跳变的核心因素, 提出了功率定值切换与相位补偿结合的控制方案, 旨在实现相角跳变过程中设备相位的主动快速跟随并保持功角稳定。研究成果可为高渗透率新能源电网中的构网设备提供暂态稳定控制指导, 尤其推动构网型储能在电网相位异常场景中的工程化应用。

本文中的构网型储能功率控制采用经典的虚拟同步机

方法, 整个构网控制结构为功率环+电压环+电流环的三环级联结构。功率环控制框图如图 1-1 所示, 电压电流内环采用经典 PI 双环结构, 电压环叠加虚拟阻抗支路用来应对末端若电网工况。

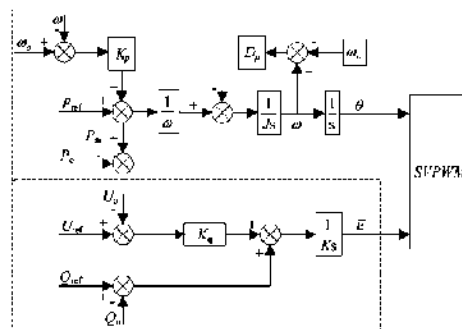


图 1-1 功率环控制框图

2 强弱电网下相角跳变的影响分析

构网设备与电网连接的等效电路如图 2-1 所示。

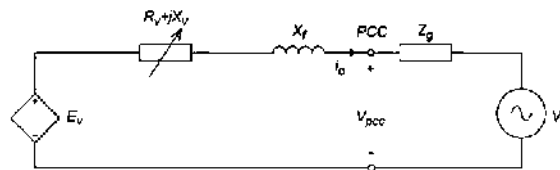


图 2-1 构网设备与电网连接的等效电路

图 2-2 所示为功角曲线和对应的矢量图, 控制架构以 E_v 的方向进行定向, 即 $E_{vd}=E_v$, $E_{vq}=0$ 。当电网侧发生相角突变时, V_g 瞬间跳变至 V_g' , 由于转子方程的作用, 频率和相位不会立即突变, E_v' 的瞬时相位变化较小, 使得功角迅速拉大, 输出电流增加, 线路压降增大, PCC 端电压降低,

若 δ_s' 变化超过临界值 δ_{th} , 则 ΔP 为正, 控制环路进一步将功角拉大导致系统失步。

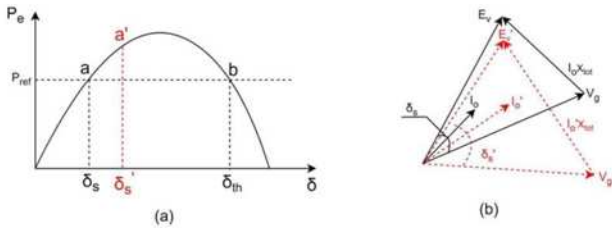


图 2-2 相角突变时的功角曲线和对应矢量图

对于不同的电网强度, 控制目标 E_v 与电网电压 V_g 不变, X_{tot} 不同时对应的功角曲线示意图如图 2-3 所示:

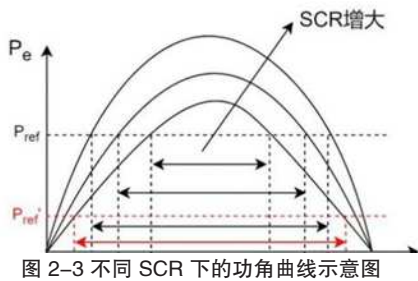


图 2-3 不同 SCR 下的功角曲线示意图

同样的功率给定 P_{ref} 下, SCR 越小即 X_{tot} 越大, 对应的功角 δ_s 越大, 相对的临界功角 δ_{th} 越小, 功角稳定裕度越小, 在电网相角跳变时, 更容易失步, 即图中功角稳定裕度 $\delta_{s1} > \delta_{s2} > \delta_{s3}$ 。进一步对比 P_{ref} 与 P_{ref}' , 同样的 SCR 下, 减小功率给定, 对应的功角 δ_s 随之减小, 相对的临界功角 δ_{th} 增大, 功角稳定裕度增大, δ_{s3}' 对应的相位裕度甚至可以超过 δ_{s1} 。因此可推断相角跳变时对应最严苛的工况为极弱电网下满功率输出。

根据以上分析以及图 2-2 (b) 中的矢量关系, 可以得到相角跳变下的应对方案为快速减小 δ_s' , 具体实施可通过额外补偿相位 δ_{com} 、减小 P_{ref} 及加速 E_v 响应等方式。

3 相角跳变算法设计

根据上述分析, 提升相角跳变暂态特性的核心途径包

括补偿相位 δ_{com} 、减小 P_{ref} 和加速 E_v 响应。根据文献 [1] 中的对比分析, 可知补偿相位 δ_{com} 的方式在强网下的补偿效果较好且实现简单, 而减小 P_{ref} 的方式不依赖采样值和外部电网条件, 只需要在检测出相角跳变后做相应幅值切换即可, 适用于弱网环境。为了让设备能够适应宽范围电网强度下的大相角跳变工况 ($\pm 60^\circ$), 本文提出一种采用相位补偿与 P_{ref} 定值切换组合的控制方式。

由图 2-2(b) 中的矢量三角关系可知, 并网电流满足式 (1)。

$$I_{omg} = \frac{\sqrt{E_v^2 + V_g^2 - 2E_v V_g \cos \delta_s}}{X_{tot}} \quad (1)$$

在固定的线路场景下, V_g 与 X_{tot} 不变, E_v 跟随 E_{vref} 不变, 因此并网电流幅值与功角 δ_s 呈正相关关系 ($\cos \delta_s$ 与 δ_s 在 $(0, \pi)$ 范围内负相关)。若不考虑电流的限幅, 则 $\delta_s < \delta_{th}$ 时对应的 $I_{omg} < I_{omg_th}$ 。文献 [4] 中详细推导说明 I_{omg_thmin} 即使在极弱网条件下 (SCR=1) 依然小于常规电流限幅值 I_{lim} , 即通过限制 $I_{omg} < I_{omg_thmin}$ 能够同时满足 $\delta_s < \delta_{th}$ 和 $I_{omg} < I_{lim}$ 。但是考虑强网工况, 小功角对应较大的电流输出, 因此强网下的扰动例如相角跳变, 即使功角 δ_s 没有触及到 δ_{th} , 但电流可能已经触发过流保护值 I_{lim} , 因此采用 $I_{omg} < I_{omg_th}$ 的方式会限制设备的功角运行区间, 因此强弱电网下的 I_{omg_th} 需要设置不同的切换阈值或者参考文献 [1] 中的方法采用滞环比较器。

设置了合适的电流幅值切换阈值后, 当电流越限后就快速减小功率给定为 P_{min} , P_{min} 可以根据电流越限程度分段设置, 也可以直接设置为最小值 0, 最大程度的保障暂态相位裕度。为了适应储能的充放电模式, 所有的功率设置都采用绝对值计算, 最后作为给定输出时, 根据充放电设置考虑符号 $sign$ 。结合相位补偿计算后的具体实现控制框图如图 3-1 所示。

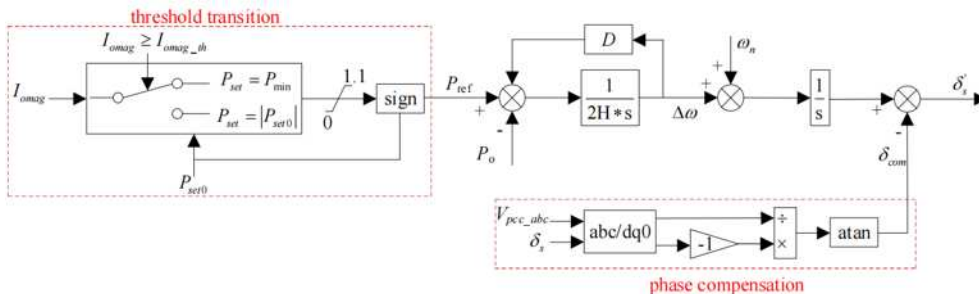


图 3-1 本文提出的针对相角跳变的控制方案框图

4 仿真验证

为验证以上方案的控制效果，搭建了一套数字仿真模型，基础功率控制参照图 1-1 中的框图，采用功率环 + 电

压环 + 电流环的结构，结合图 3-1 中相角跳变方案后的仿真模型的整体结构如图 4-1 所示。

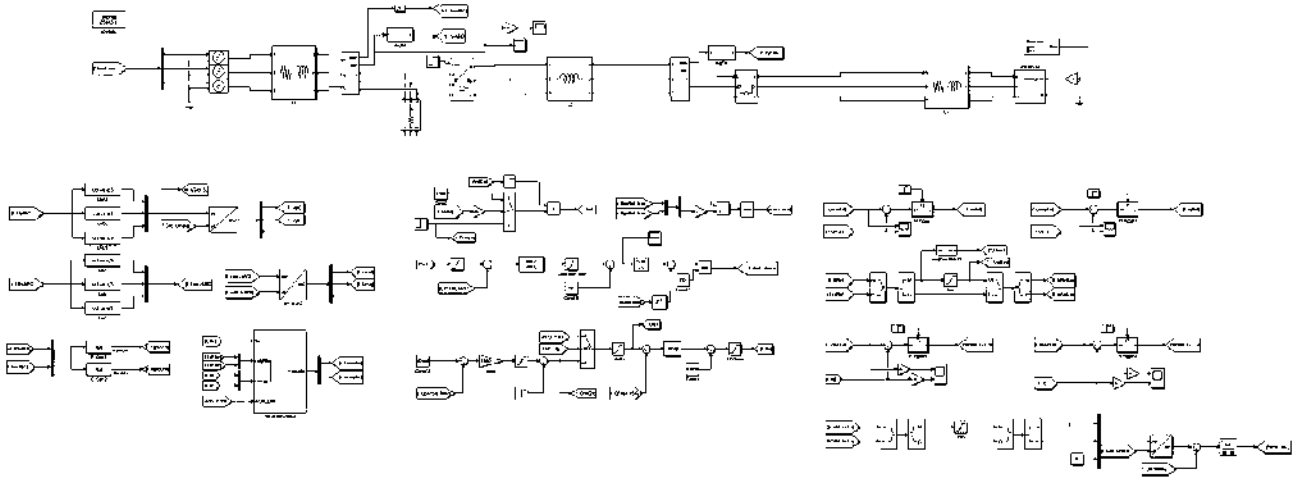


图 4-1 数字仿真模型整体结构图

分别在强弱电网下进行测试，强网采用 SCR=10，弱网采用 SCR=1.2 的设

置，考虑最新标准中对构网设备的 3 倍过载能力的要求，本文中采用 3 倍过流 作为电流限幅设置。

在 SCR=1.2 的工况下进行测试，初始功率为 1.0pu(放电)，2s 的时候电网电压相位突变 -60° ，不使能图 4-1 中的相角跳变控制方案，功率测试波形、三相电流测试波形、补偿的相角波形、频率测试波形测试结果如图 4-2 所示。

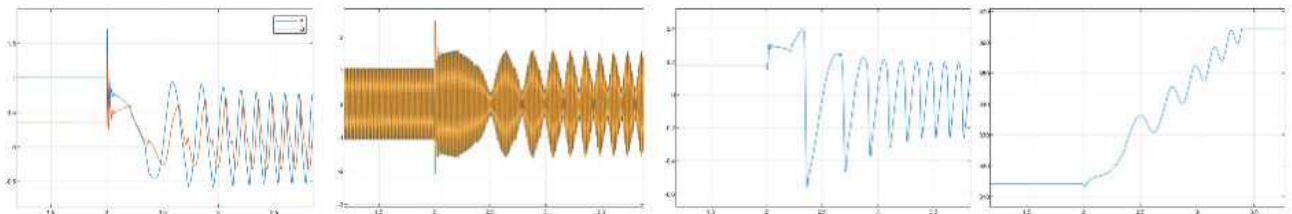


图 4-2 SCR=1.2 不使能相角跳变方案的测试波形

弱网下初始相角裕度较强网小，瞬时跳变时没有任何应对措施，无法将暂态功角拉回至稳定边界内，控制环路进一步加剧失步有功无功均振荡，频率振荡增加至限幅。但弱网下由于线路电抗较大，限流作用相对较好，跳变瞬间电流的冲击峰值在允许范围内，强网条件下需要更严苛的过流限

幅条件。

与图 4-2 测试工况保持一致，仅使能相角跳变方案，即增加相位补偿与功率定值切换，功率测试波形、三相电流测试波形、补偿的相角波形、频率测试波形测试结果如图 4-3 所示。

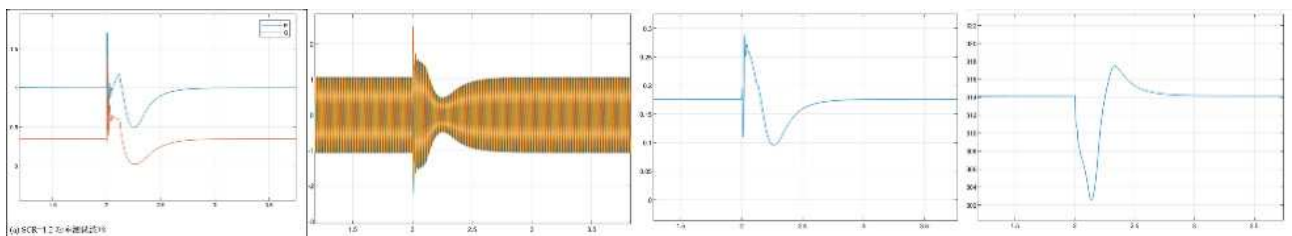


图 4-3 SCR=1.2 使能相角跳变方案的测试波形

图 4-3 中系统经过控制器调节后最终趋于稳定。跳变瞬间电流瞬时过流至 2.3pu，此时电流阈值切换，将有功功

率给定瞬间拉至零功率。对应的暂态功角迅速减小，而后随着功率环的调节，电流幅值逐渐下降至阈值内，有功给定

重新增加至跳变前的给定值，功率环同步完成整个相角跳变调节。

在 SCR=10 的工况下进行测试，初始功率为 1.0pu(放电)，2s 的时候电网电压相位突变 -60° 。

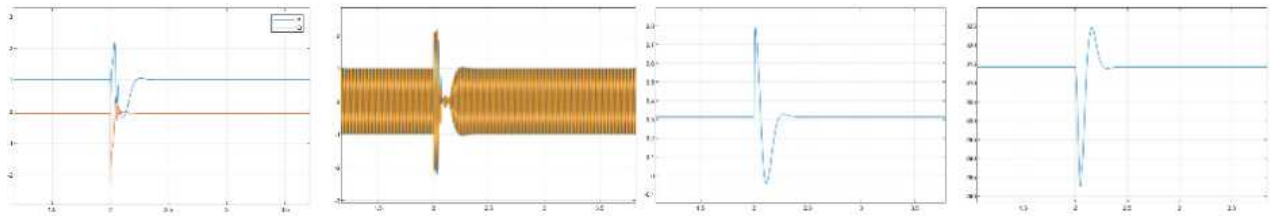


图 4-4 SCR=10 下的相角跳变测试波形

由仿真测试波形可以看出，强网下引入电流阈值切换控制对于相角跳变性能影响不大，单纯的相位补偿就能够满足需求。但比较强弱电网下的输出电流幅值和功率响应波形可以发现，强网下更容易过流，调节时间短，这与线路阻抗大小紧密相关。

下的直接相位补偿方案互为补充，可提升构网型储能设备在宽范围电网强度下大相角跳变的适应能力。

通过以上测试可以说明图 3-1 中方案的有效性，电流阈值切换控制可以改善弱电网下的相角跳变特性，与强网

在完成数字仿真验证后，进一步进行半实物测试，参数设置与测试条件同数字仿真工况，测试 SCR=10 的场景下，相角跳变 -10° 、 -30° 及 -60° 的系统运行特性，进一步验证了本文中提出的相角跳变控制算法设计能够实现 SCR 从 1~40 的宽范围不脱网运行，试验结果与仿真测试基本一致。

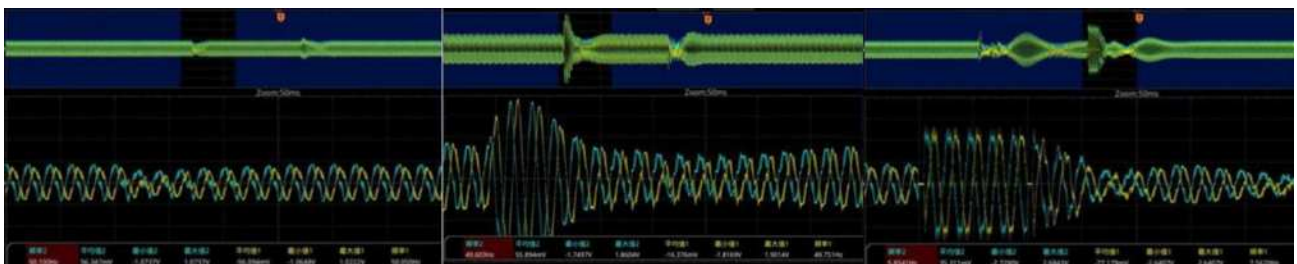


图 4-5 SCR=10 下的相角跳变试验波形

5 结论

本文针对构网型设备在强弱电网下相角跳变引发的暂态稳定性问题，通过深入分析相角跳变对系统动态特性的影响，提出了提升相角跳变暂态稳定性的核心途径，并设计了一种结合功率定值切换与相位补偿的控制方案。研究表明，所提出的控制策略能够有效抑制相角跳变，显著改善构网型设备在暂态过程中的相角动态特性，从而增强系统在强弱电网条件下的暂态稳定性。仿真和实验验证进一步证实了该控制方案的有效性和实用性。

参考文献：

- [1] ZHANG Xing, LI Ming, GUO Zixuan, et al. Review and perspectives on control strategies for renewable energy grid-connected inverters[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 506-515.
- [2] Meng Zhiwei, Hou Yuqiang, Fang Yongjie, et al. Large-Disturbance Rotor Angle Stability Analysis of Strong-Damping Voltage Source Virtual Synchronous Generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 44-50.
- [3] Lasseter R H, Chen Z, Pattabiraman D. Grid-Forming Inverters: A Critical Asset for the Power Grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2):925-935.DOI:10.1109/JESTPE.2019.2959271.
- [4] Heng Wu, Xiongfei Wang. Control of Grid-Forming VSCs: A Perspective of Adaptive Fast/Slow Internal Voltage

本文的研究成果为构网型设备在复杂电网环境下的稳定运行提供了重要的理论依据和实用化解决方案，对提升电力系统的可靠性和稳定性具有积极意义。未来的研究可以进一步优化控制参数，拓展该策略在不同电网场景下的适用性，以应对更加复杂的电力系统运行挑战。

Source[J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, 2023, 38(8), 10151–10169.

[5] Khayat Y , Chen P , Bongiorno M ,et al.FRT Capability of Grid-Forming Power Converters: An Antiwindup Scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 39[2025-02-15]. DOI:10.1109/TPEL.2024.3424539.

[6] Zheng Tao, Wang Ziming, Zou Pengying. Research on Low Voltage Ride-Through Control Strategy of Virtual Synchronous Generator Based on Phase Jump Compensation[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 100–108.

作者简介: 崔润玉 (1996–12), 女, 汉族, 陕西省渭南市, 本科, 工程师, 研究方向: 综合能源系统与能源互联网。